

Evaluando el Consumo de Redes BLE/LoRaWAN para IoT

Celia Garrido-Hidalgo¹, Diego Hortelano,² Luis Roda-Sánchez,³
Teresa Olivares⁴ y M. Carmen Ruiz⁵

Resumen— En este trabajo se ha llevado a cabo el despliegue de un prototipo de red heterogénea para Internet de las Cosas (IoT) basada en las tecnologías *Bluetooth Low Energy* (BLE) y *Long Range Wide-Area Network* (LoRaWAN) en el Instituto de Investigación en Informática de Albacete (I³A). Se ha propuesto un modelo de arquitectura en que nodos de ambas tecnologías, basados en la misma plataforma controladora, intercambian información a partir del back-end *The Things Network* (TTN) con objeto de evaluar el consumo de los mismos bajo distintas configuraciones. A partir de la toma de medidas de consumo de corriente en cada dispositivo, se ha realizado una estimación para determinar la vida útil de su batería. En base a los resultados obtenidos, se aportan algunas recomendaciones que han sido evaluadas durante los experimentos para mejorar la duración de la batería, obteniéndose resultados satisfactorios. Se propone la futura incorporación de nuevas tecnologías al prototipo desplegado, así como distintas topologías, conformando un banco de pruebas para la evaluación de algoritmos de eficiencia energética en redes IoT.

Palabras clave— IoT, BLE, LoRaWAN, TTN, consumo energético

I. INTRODUCCIÓN

ACTUALMENTE atravesamos una etapa caracterizada por el auge de las tecnologías de la información motivadas por la aparición del Internet de las Cosas (*Internet of Things*, IoT [1]). Se trata de un amplio concepto que no sólo ha causado un gran impacto en la sociedad actual a partir de sus innumerables aplicaciones, sino que se encuentra en pleno desarrollo en sectores tales como la industria, la agricultura, o la medicina (IoT Industrial [2]). Uno de los retos más extendidos en este contexto es la estandarización, ya que actualmente el mercado dispone de infinidad de dispositivos que cuentan con protocolos propietarios que impiden la conectividad con otras tecnologías similares. Sin embargo, en los últimos años, la tendencia de utilizar plataformas abiertas así como protocolos estandarizados ha crecido de manera exponencial, lo que ha contribuido a un desarrollo pleno de IoT gracias a la creación de comunidades y una colaboración conjunta por parte de los usuarios que componen la red.

El auge de los Sistemas Ciber-Físicos (*Cyber-Physical Systems* [3]) hace necesaria la colaboración entre redes inalámbricas de distinta naturaleza, ya que algunos de los requerimientos más destacados incluyen funcionamiento en tiempo real, ausencia de transmisiones fallidas, gran ancho de banda, largo alcance y mínimo consumo energético. Todos estos requerimientos no pueden satisfacerse a partir de una única tecnología de red, por lo que el despliegue de redes heterogéneas de sensores (*Wireless Sensor Networks*, WSN) está cada vez más presente en la actualidad, coexistiendo redes gobernadas por distintas tecnologías capaces de obtener el máximo rendimiento mediante un coste reducido. La creciente necesidad de aprovechamiento de los recursos energéticos con el fin de contribuir a la sostenibilidad de IoT hace que resulte imprescindible considerar todo tipo de medidas y algoritmos que contribuyan a prolongar la vida útil de los dispositivos conectados a Internet. Según Cisco [4], se espera que la evolución de IoT alcance su pleno desarrollo alrededor del año 2020, momento en que se estima una relación de 6.5 dispositivos inteligentes por persona; cincuenta mil millones de dispositivos.

Este artículo propone la evaluación de las tecnologías *Bluetooth Low Energy* (BLE [5]) y *Long Range Wide-Area Network* (LoRaWAN [6]). Ambas tecnologías cuentan con aportaciones positivas así como limitaciones en aplicaciones para IoT, con lo que se ha evaluado su cooperación, dando solución a las restricciones que ambas conllevan. Para ello, se ha desplegado un prototipo de red híbrida en el Instituto de Investigación en Informática de Albacete (I³A), en el que se ha evaluado el consumo de diferentes nodos bajo configuraciones distintas, persiguiéndose la mejora de su eficiencia energética.

Este trabajo está estructurado de la siguiente forma: la Sección II se corresponde con el estado del arte. En la Sección III se analiza brevemente el funcionamiento de las tecnologías seleccionadas, incluyéndose los principales dispositivos que se han utilizado para la puesta en funcionamiento del prototipo. En la Sección IV se proponen los principales materiales y métodos usados para los experimentos, proponiéndose un conjunto de casos de estudio que son desarrollados en la Sección V, donde se ha medido el consumo de corriente real de los nodos de la red bajo distintas configuraciones. Finalmente, en la Sección VI se exponen las conclusiones y principales aportaciones, proponiéndose futuras líneas de trabajo para la evaluación de tecnologías adicionales.

¹Instituto de Investigación en Informática de Albacete, UCLM, Albacete, España, email: Celia.Garrido@uclm.es.

²Instituto de Investigación en Informática de Albacete, UCLM, Albacete, España, email: Diego.Hortelano@uclm.es.

³Instituto de Investigación en Informática de Albacete, UCLM, Albacete, España, email: Luis.Roda@uclm.es.

⁴Escuela Superior de Ingeniería Informática, UCLM, Albacete, España, email: Teresa.Olivares@uclm.es.

⁵Escuela Superior de Ingeniería Informática, UCLM, Albacete, España, email: MCarmen.Ruiz@uclm.es.

II. ESTADO DEL ARTE

Este trabajo está motivado por la reciente incorporación de tecnologías LPWAN al campo de aplicación de IoT. Encontrándose claramente definidos los retos y arquitecturas para su desarrollo [7] [8]. Sin embargo, el modelo de comunicaciones se encuentra sometido a numerosos cambios, definiéndose una clara tendencia hacia la coexistencia de redes heterogéneas de sensores [9]. Los esfuerzos por implantar tecnologías con un bajo impacto ambiental son cada vez más evidentes, persiguiéndose en determinadas aplicaciones que los dispositivos alcancen una larga vida útil mediante un consumo muy reducido [10] [11]. Sin embargo, también se persigue obtener velocidades de respuesta reducidas en redes orientadas a la colaboración con usuarios, donde BLE es una de las soluciones más extendidas debido a su bajo consumo y gran escalabilidad. Este trabajo propone una visión de conjunto de las tecnologías BLE y LoRaWAN, persiguiéndose la incorporación de tecnologías LPWAN a redes locales basadas en BLE. Algunos trabajos introducen diversas soluciones basadas en el uso de tecnologías LPWAN [12], siendo LoRaWAN y Sigfox las más aceptadas generalmente. Estas tecnologías cuentan con una serie de restricciones debido a las bandas de frecuencias en que operan, siendo analizadas en detalle en el trabajo [13]. Algunas de las ventajas más destacables que introducen estas tecnologías están referidas al alcance y la escalabilidad [14].

Por otra parte, BLE es una tecnología que ha evolucionado exponencialmente en los últimos años debido a las exigencias de IoT. Desde la especificación 4.0 (lanzada en el año 2010) hasta la reciente adopción de la especificación 5.0 [15] (2016), pasando por las especificaciones 4.1 [16] y 4.2 [17], se ha duplicado la velocidad de transferencia, se ha cuadruplicado el rango y se ha flexibilizado la forma en que los dispositivos implementan la comunicación para posibilitar cada vez redes más escalables [18].

En este trabajo se propone una arquitectura compuesta por una subred BLE basada en pequeños intervalos de bajo consumo para los nodos que coopera con una subred LoRaWAN/BLE. La puesta a prueba de ambas tecnologías en una única red no se ha analizado hasta el momento desde un punto del consumo energético, lo que se convierte en una de las contribuciones más destacadas de este trabajo mediante la cuantificación del consumo real de los dispositivos LoRaWAN y BLE trabajando con distintas configuraciones en la red.

III. ESTÁNDARES DE COMUNICACIÓN IoT

El prototipo de red que se presenta para llevar a cabo al evaluación energética consiste en una WSN heterogénea desplegada en el I³A y compuesta por las tecnologías LoRaWAN y BLE. Se propone la cooperación entre dichas tecnologías desempeñando roles diferenciados en la red en función de sus limitaciones y aportaciones positivas.

A. Bluetooth Low Energy

En esta sección se aporta una breve introducción al estándar BLE, incluyéndose los modos de operación definidos en las distintas especificaciones así como las topologías disponibles. De acuerdo con la especificación, BLE viene definida por una topología en estrella donde se distinguen dos modos de operación en función del tipo de conexión establecida entre los dispositivos que llevan a cabo el intercambio de datos:

- Intercambio de datos con conexión: sigue un modelo maestro-esclavo en el que se requiere que previamente se encuentren conectados los dispositivos que van a comenzar la transferencia de datos. Para ello, el nodo maestro debe descubrir los *servicios* y las *características* del nodo esclavo enviándose y recibiendo los datos a partir de la lectura o escritura en determinadas *características*. En función del dispositivo, se pueden encontrar características con propiedades de *notificación* o *indicación* que permiten que un nodo sea avisado cuando existan nuevos datos disponibles en dicha *característica*.
- Intercambio de datos sin conexión: se distinguen los roles *scanner* y *advertiser*, siendo el primero de ellos el encargado de escanear la red en busca de nuevos datos y el segundo el encargado de emitir paquetes de datos que serán captados por cualquier *scanner* en la red. A partir de este modo de operación se permite la escalabilidad en las redes BLE, aunque se imposibilita el flujo de información bidireccional, tan sólo los *advertisers* pueden transmitir paquetes de datos.

En este trabajo se ha centrado la atención en el modo de intercambio de datos con conexión con objeto de posibilitar que la información fluya en ambos sentidos. Es importante destacar la influencia del intervalo de *advertising* definido en la configuración de los dispositivos, ya que éste es el principal responsable del consumo del dispositivo bajo una determinada potencia de transmisión preestablecida. Este intervalo se define desde 20 milisegundos (máximo consumo) hasta 2.5 segundos (menor consumo).

B. LoRa y LoRaWAN

LoRaWAN es un estándar abierto para comunicaciones de red de área extensa y bajo consumo (*Low-Power Wide-Area Network*, LPWAN) muy extendido en la actualidad debido a su campo de aplicación en IoT. Trabaja a nivel de la capa de enlace de datos para implementar la red, basándose en la capa física definida por LoRa [19]. La red LoRaWAN utiliza una topología en estrella de estrellas, donde un dispositivo ejerce una función de gateway y retransmite mediante el protocolo IP los paquetes entre los nodos de campo (end-devices) y un servidor de red centralizado. El objeto del despliegue de redes basadas en LoRaWAN es su globalización como red IoT de manera que un sólo gateway pueda proporcionar cobertura de red a miles de dispositivos conectados.

LoRaWAN opera en la banda de frecuencias de 863-870 MHz en Europa. Por ello se presentan algunas limitaciones en el uso de la red, debiéndose destacar un máximo ciclo de trabajo del 1% que viene impuesto por el Instituto Europeo de Estándares y Comunicaciones (*European Telecommunications Standards Institute*, ETSI [20]). El rango de cobertura que abarca, a pesar de depender en gran medida del hardware adoptado y su localización, puede abarcar hasta 2 km en terreno urbano y 15 km en terreno rural. Está intrínsecamente relacionado con el *Spreading Factor* (SF, referido a la redundancia en el envío de datos), siendo inversamente proporcional a la velocidad de transferencia de datos (*data rate*, DR). Por tanto, es posible aumentar el SF (reduciéndose el DR) para posibilitar un mayor alcance en cuanto al acceso a un gateway lejano. Sin embargo, como cabe esperar, esta disminución de la tasa de transferencia implica un mayor consumo energético derivado del tiempo requerido en el envío (*time-on-air*) así como un mayor porcentaje de ocupación del canal de transmisión.

The Things Network (TTN [21]) es un back-end cuya iniciativa se basa en consolidar una red de datos de IoT global operada y utilizada por los propios usuarios. Actualmente, esta red está basada en la tecnología LoRaWAN, aunque no se descarta la participación de tecnologías adicionales en el futuro. Hasta el momento, España cuenta con un total de 25 gateways reconocidos en TTN, los cuales proporcionan cobertura a esta red IoT global desde distintas localizaciones geográficas. Este trabajo abarca la contribución al despliegue de la red mediante un gateway localizado en el I³A que ha posibilitado la pasarela entre una red BLE en el back-end TTN.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se definen los materiales utilizados así como la metodología llevada a cabo para la implementación del testbed con objeto de evaluar energéticamente distintos modos de operación en una red híbrida BLE/LoRaWAN.

La arquitectura en la que se han basado los experimentos presentados se muestra en la figura 1 y se compone de dos subredes diferenciadas. El esquema de red planteado se ha desplegado en el I³A, tratándose de un prototipo de red híbrida entre las tecnologías BLE y LoRaWAN en la que se su cooperación para afrontar la limitación impuesta por el *time-on-air* derivado de transmisiones downlink LoRaWAN. El sistema tomado como referencia para las pruebas forma parte de una amplia red de contexto orientada a la monitorización ambiental de escenarios para la Industria 4.0, donde se persigue el envío ocasional de datos ambientales.

Asimismo, la subred representada a la izquierda de la figura 1 está compuesta únicamente por la tecnología BLE, orientada a aplicaciones de comunicación bidireccional, en menores intervalos de tiempo. Al tratarse de un modelo de red que se encuentra directamente en contacto con el usuario, se

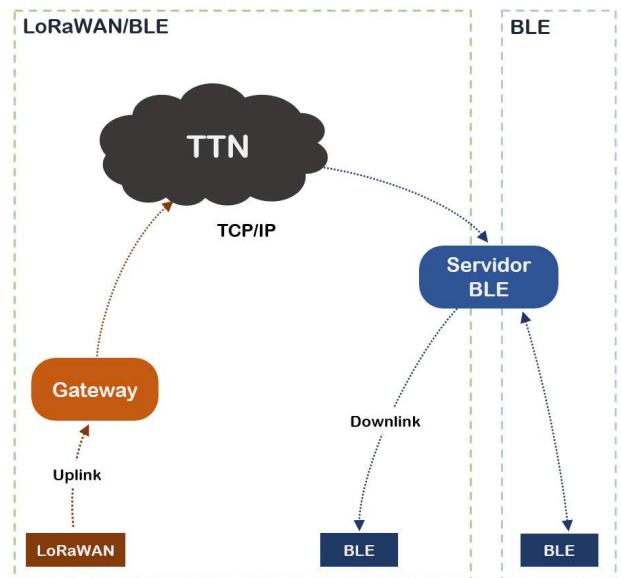


Fig. 1. Topología del prototipo de red LoRaWAN/BLE

espera un tiempo de respuesta reducido y disponibilidad absoluta para la recepción de información en los dispositivos periféricos.

El nivel más bajo del prototipo de red consiste en un nodo LoRaWAN orientado al envío de información mayoritariamente ambiental así como un nodo basado en BLE pensado para la comunicación bidireccional con un servidor local. Para ello, los módulos de radio utilizados (ver figura 2) se han conectado a dos placas controladoras Waspnote v1.2 [22] de iguales especificaciones. Se ha utilizado el módulo de radio BLE de 2,4 GHz BLE112 [23] perteneciente a la especificación 4.0 de Bluetooth (figura 2(a)) y el módulo LoRaWAN de 868 MHz RN2483 [24] (figura 2(b)). Asimismo, para la puesta en funcionamiento y configuración de un gateway capaz de dar cobertura LoRaWAN se ha utilizado el concentrador ic880A conectado a una placa computadora Raspberry Pi 2B [25] (ver figura 2(c)).

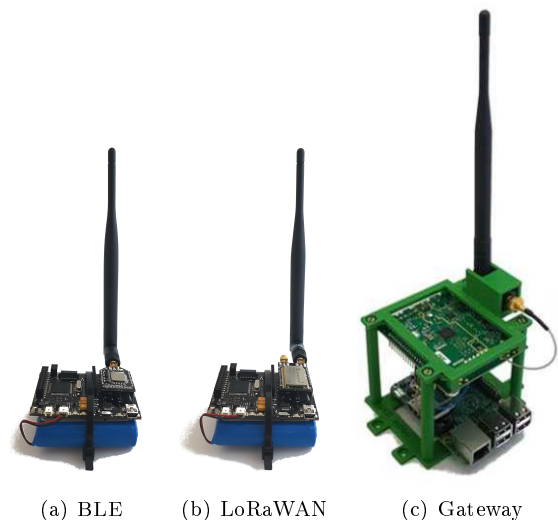


Fig. 2. Placas controladoras y módulos de radio utilizados

A. Configuración de los nodos LoRaWAN/BLE

La heterogeneidad de una red LoRaWAN/BLE viene dada por las necesidades de comunicación a lo largo de grandes distancias y la demanda de tecnologías colaborativas que impliquen un consumo reducido. Teniendo en cuenta que la interconexión de dispositivos LoRaWAN a través de TTN se realiza mediante gateways, al tratarse de una red formada y operada por usuarios ha sido necesario llevar a cabo el despliegue de un gateway en el I3A. La figura 3 muestra la ubicación de los gateways desplegados hasta el momento en España, encontrándose entre ellos (en la localidad de Albacete) el perteneciente al testbed propuesto.

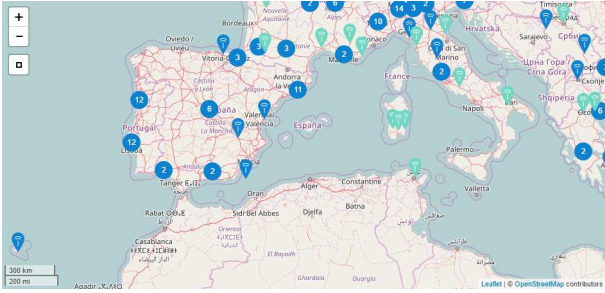


Fig. 3. Gateways reconocidos en TTN desplegados en España

El gateway desplegado, de carácter público, se ha configurado para la retransmisión IP de los paquetes recibidos a TTN para ser posteriormente tratados, pudiendo soportar miles de end-devices enviando paquetes de datos al el back-end. Sin embargo, la coexistencia de un número elevado de end-devices implica una serie de limitaciones a considerar en cuanto a la comunicación. Esto restringe el tiempo on-air por dispositivo y canal de transmisión en este tipo de redes y, por tanto, determina el máximo número de paquetes uplink que podrán enviarse en función de los SF y DR configurados.

Los paquetes retransmitidos por un gateway son encriptados, de manera que el envío de información desde un end-device hasta TTN a través de distintos gateways permite que tan sólo el propietario del end-device pueda acceder a la información contenida en los paquetes y tratarlos posteriormente. Para ello, se ha configurado una aplicación con la que se ha posibilitado la recepción de los paquetes del end-device en el back-end y su posterior envío a un servidor local encargado de la gestión de la red BLE.

Con objeto de asegurar un determinado número de dispositivos por cada gateway desplegado, TTN cuenta con una política que limita la capacidad comunicativa de los nodos. En concreto, define un time-on-air máximo de 30 segundos por dispositivo y día de funcionamiento, lo cual se traduce en un total de 1000 dispositivos por gateway. Como es de esperar, en función de la configuración de cada dispositivo (DR y SF) se puede optimizar el número máximo de paquetes diarios uplink sacrificando el alcance de la comunicación establecida (disminución de SF y aumento de DR). A modo de ejemplo, un

end-device operando de acuerdo con la política de TTN puede enviar diariamente desde aproximadamente 20 paquetes de 10 bytes (SF máximo) hasta 500 (SF mínimo).

LoRaWAN permite la comunicación bidireccional, pudiéndose enviar paquetes al back-end así como recibirse confirmaciones. Sin embargo, debido a la limitación de ocupación del canal, se ha establecido una arquitectura en la que el tráfico downlink se envía a un servidor local y se transmiten en modo maestro/esclavo a una red local BLE para su uso en distintas aplicaciones. Esta configuración se ha adoptado en el prototipo desplegado para el desarrollo de los experimentos en una red compuesta por ambas tecnologías, no cerrándose la posibilidad de definir distintas configuraciones en futuras ampliaciones del trabajo.

En cuanto a la red BLE, se propone como recomendación la permanencia del módulo de radio en estado de bajo consumo (sleep) en situaciones en que no se requiera el envío de datos, encontrándose disponible mediante paquetes aislados de *advertising* para su conexión por parte de un maestro (ver figura 4).

Ese modo de operación se ha puesto a prueba en los experimentos con objeto de determinar la mejor energética que aporta con respecto a una conexión maestro/esclavo constante con envío de información basada en eventos de *notificación*. Esta comparativa se ha llevado a cabo en la Sección V-E, donde se muestra el consumo de corriente demandado por la transmisión del módulo de radio BLE en cada uno de los casos.

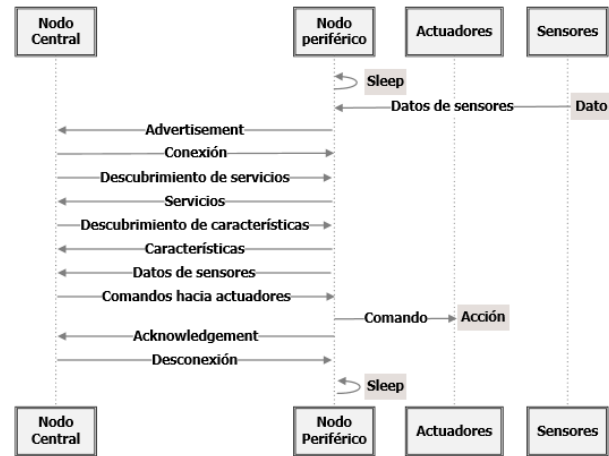


Fig. 4. Algoritmo BLE para redes centralizadas

B. Medida de corriente instantánea

El estudio propuesto se basa en la evaluación del consumo energético del prototipo de red que ha sido desplegado con distintas configuraciones, con objeto de proceder posteriormente al escalado de la red en función de las conclusiones obtenidas en cuanto a tiempos de respuesta y consumo energético. Para la medición de corrientes instantáneas en los nodos, se ha utilizado una placa sensora de bajo coste basada en el amplificador de instrumentación INA219 [26] y

una resistencia de shunt de 0,1 Ohmios. En rangos de medida comprendidos entre ± 400 mA se consigue una resolución de hasta 0,1 mA en las medidas, lo cual no resulta una limitación para el estudio del consumo de nodos sensores como los descritos, ya que se estima que su consumo global no alcance los 50 mA en aplicaciones de monitorización.

V. EVALUACIÓN DEL CONSUMO EN LA RED

En esta sección se evalúa el consumo energético de la red en conjunto considerando cada una de las subredes definidas con anterioridad. Para ello, se propone la combinación de distintas configuraciones en las redes BLE y LoRaWAN que solucionen problemas existentes tales como la velocidad de la red, el alcance o incluso la escalabilidad, cuantificándose en todas ellas el consumo energético.

De acuerdo con la arquitectura propuesta para los experimentos (ver figura 1), los paquetes enviados por el end-device son retransmitidos por el gateway hasta el back-end TTN y recibidos en un servidor local BLE que finalmente se conecta a un periférico para el envío de los mismos.

Es importante destacar que, para los experimentos realizados (Secciones V-A, V-B y V-C), se ha medido el consumo total de la plataforma Wasmote con cada uno de los dos módulos de radio propuestos (LoRaWAN y BLE) con objeto de estimar la vida útil de la batería en condiciones normales de funcionamiento y para distintos intervalos de envío. Para ello, se ha considerado una batería recargable de litio-ión con un voltaje de 3.7 V y una capacidad nominal de 6600 mAh.

En la Sección V-E se proponen algunas recomendaciones en cuanto a la configuración de los dispositivos que persiguen una mejora de la vida útil en condiciones de operación periódicas, donde se considera la posibilidad de modificar el consumo de la placa controladora que gestiona el módulo de radio.

A. Experimento 1. DR1-BLE_{Sleep}

Uno de los atributos más destacables en redes basadas en LoRaWAN es el alcance. Sin embargo, según se ha analizado anteriormente éste viene condicionado por la velocidad de transferencia de datos y el tiempo on-air. En este experimento se ha configurado el end-device LoRaWAN para el envío de un paquete de tamaño fijo, utilizando el modo DR1/SF11. El periférico BLE receptor ha sido configurado con un intervalo intermedio de advertising, permaneciendo el módulo de radio en modo de ahorro de energía hasta que sucede el evento de conexión.

La medición de corriente llevada a cabo en en los dispositivos se muestra en la figura 5, obteniéndose un tiempo aproximado de 2 segundos (0.9052 segundos de on-air-time) entre la salida del paquete vía LoRaWAN y su llegada al dispositivo periférico BLE.

Debido a la gran demanda de dispositivos operados por baterías que permitan la comunicación a través de largas distancias en aplicaciones de ciudades inteligentes así como agricultura, esta configuración de

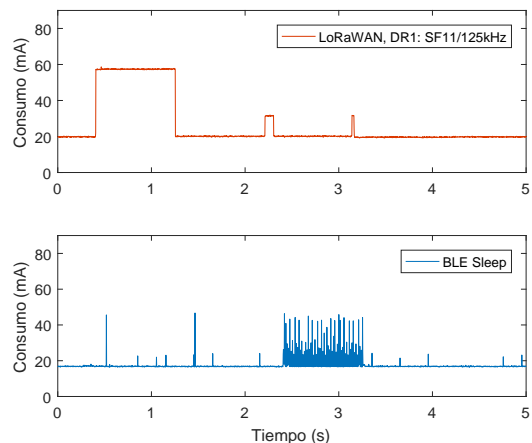


Fig. 5. Experimento 1. DR1-BLE_{Sleep}

red ofrece distintas posibilidades. Sin embargo, las restricciones impuestas en el máximo tiempo on-air admisible por dispositivo y canal impondría el envío de paquetes aislados en el tiempo si se usa esta configuración de red, lo cual restringe su aplicabilidad a escenarios en que se requiera el envío de datos a través de largas distancias aunque de manera esporádica.

En la tabla I se ha recogido el consumo del nodo LoRaWAN (envío e inactividad), encontrándose en la tabla II los valores medidos para el nodo BLE receptor analizado en este experimento (recepción e inactividad).

B. Experimento 2. DR5 - BLE_{Sleep}

La configuración de la red llevada a cabo para el segundo experimento consiste en el modo DR5/SF7 para el módulo LoRaWAN así como al permanencia del módulo BLE en modo de ahorro de energía durante el período que éste no reciba información de la red LoRaWAN. En este experimento cabría esperar el mínimo consumo que podría darse en los end-devices de una arquitectura como la propuesta para la red híbrida en conjunto, donde el incremento de DR (y disminución de SF) hacen que la red cuente con un menor rango de cobertura.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 6, donde se puede apreciar una notable diferencia en cuanto al tiempo on-air derivado del modo DR5 (0.067 segundos) en comparación con el obtenido para DR1 en el envío del módulo LoRa. Asimismo, en términos generales, el desfase de tiempo entre la salida y la llegada del paquete ha sido de, aproximadamente, 1 segundo.

En la tabla I se muestran los valores medios de corriente instantánea obtenidos para esta configuración de red referida a LoRaWAN, encontrándose de manera análoga las mediciones de consumo en el dispositivo BLE en la tabla II.

C. Experimento 3. DR5 - BLE_{20ms}

En este experimento se ha configurado el módulo LoRaWAN en el modo DR5/SF7, al igual que en el caso anterior. En cuanto al dispositivo BLE, se

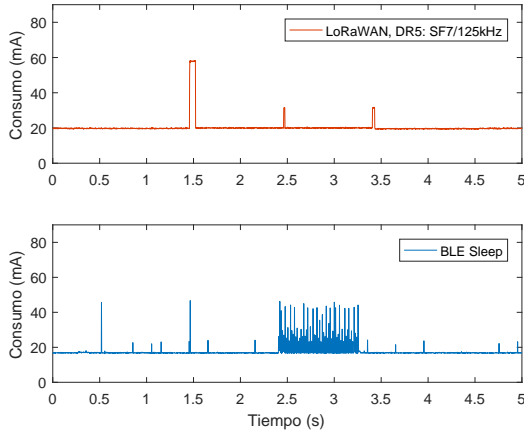


Fig. 6. Experimento 2. DR5 - BLE_{Sleep}

ha querido caracterizar el consumo que tiene lugar en modo de operación activo, configurado un intervalo de *advertising* de 20 milisegundos. Dado que el análisis de dispositivos reales implica la obtención de resultados variables en función de las condiciones físicas del entorno, así como la existencia de interferencias con otras tecnologías de red, se han obtenido en este caso tiempos de desfase entre la salida del paquete vía LoRaWAN hasta la llegada al periférico BLE de entre 0.9 s y 1.1 segundos.

Esta configuración, posibilita la escalabilidad de la red a partir de un mayor número de dispositivos LoRaWAN formando parte de la misma, así como un mayor número de paquetes diarios permitidos según las restricciones existentes. La medición de corriente llevada a cabo en en los dispositivos se muestra en la figura 7.

Al igual que en los casos anteriores, el consumo del nodo LoRaWAN configurado con SR5/SF7 se encuentra recogido en la tabla I. El consumo medido en el caso del nodo BLE se muestra en la tabla II, donde se puede apreciar que prácticamente no existe diferencia entre el consumo en espera y en recepción, ya que el hecho de mantener activa la radio emitiendo paquetes de *advertising* hace que se eleve el consumo en gran medida.

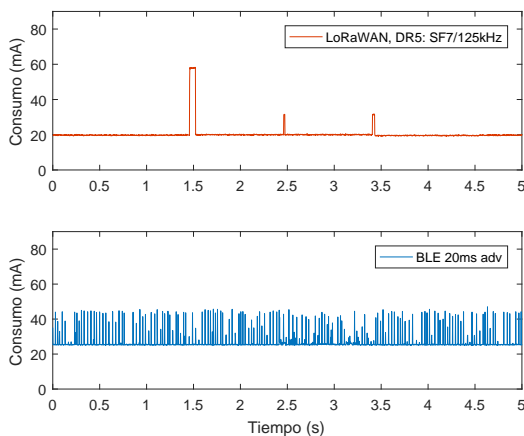


Fig. 7. Experimento 3. DR5 - BLE_{20ms}

D. Evaluación de resultados

Una vez analizadas las configuraciones propuestas en el prototipo de red desplegado, se ha llevado a cabo un resumen donde se recogen los consumos medios en función del estado del módulo de radio. Este resumen se proporciona a partir de las tablas I y II (tecnologías LoRaWAN y BLE, respectivamente) cuyo contenido se analiza a continuación:

- tabla I. Proporciona una comparativa entre los modos de configuración DR1/SF11 y DR5/SF7 en un módulo de radio LoRaWAN. En la realización de los experimentos de la red híbrida, se ha considerado un rol transmisor del nodo LoRaWAN, por lo que en esta tabla se recogen los consumos medio durante la transmisión del módulo de radio, así como el consumo en estado inactivo (debido en gran proporción al consumo base de la plataforma Wasmote).
- tabla II. Muestra el consumo medio obtenido en la placa controladora analizada cuando BLE se encuentra en los estados de espera y recepción, en base a los experimentos realizados en al red híbrida LoRaWAN/BLE.

TABLA I
CONSUMO MEDIO PARA LAS CONFIGURACIONES LoRaWAN

	DR1/SF11	DR5/SF7
Tx	57.39 mA	57.87 mA
Rx	-	-
Inactivo	19.84 mA	19.75 mA

TABLA II
CONSUMO MEDIO PARA LAS CONFIGURACIONES BLE

	Activo	Sleep
Tx	-	27.24 mA
Rx	26.47 mA	19.73 mA
Inactivo	26.34 mA	16.95 mA

Una vez extrapolado el consumo de los distintos dispositivos de la red, se ha llevado a cabo una breve estimación que determina la vida útil de los dispositivos en función de la batería propuesta (6600 mAh). Para ello, se han tomado como referencia los valores de corriente media obtenidos en los experimentos, dividiéndose por el valor nominal de la capacidad de la batería para obtener una estimación de vida útil en horas de funcionamiento.

Debido a la corta duración del pico de consumo por envío del nodo LoRaWAN así como por recepción del nodo BLE, a partir de intervalos de comunicación mayores a 3 minutos se obtienen consumos medios por ciclo que tienden al consumo medido en estado de inactividad. Por tanto, el consumo de corriente medio del dispositivo LoRaWAN para bajas frecuencias de envío (típicamente aplicaciones de monitorización ambiental) tiende aproximadamente a 19.8 mA. De manera análoga, si se toma como referencia

un estado de bajo consumo (sleep) en períodos de inactividad de la radio BLE, se obtiene una tendencia de consumo medio de 17 mA, aproximándose éste a 26.3 mA en caso contrario.

Teniendo en cuenta las aproximaciones anteriores en que, aún configurándose el módulo de radio de las tecnologías LoRa y BLE bajo distintas funcionalidades el consumo depende mayoritariamente de la corriente base demandada por la placa controladora Waspote, se han llevado a cabo distintas estimaciones de la vida útil de los nodos en la red:

- LoRaWAN. Considerando un consumo medio por ciclo de 19.8 mA así como una batería de capacidad nominal de 6600 mAh, se ha estimado una duración aproximada de la batería de 333.33 horas, 13.9 días de vida útil.
- BLE. En configuraciones basadas en el modo de ahorro de energía del módulo de radio en períodos de inactividad, la vida útil alcanzada ha resultado ser de 388 horas, es decir, 16.2 días de duración. De manera análoga, para configuraciones activas del módulo de radio en dichos períodos, se reduce la vida útil del dispositivo a 10.5 días.

E. Recomendaciones de uso

En base a los resultados obtenidos, se proponen a continuación una serie de prácticas referidas al despliegue de redes basadas en las tecnologías analizadas. En los experimentos realizados en las Secciones V-A, V-B y V-C, se ha modificado la configuración de los módulos de radio LoRa y BLE. Sin embargo, de acuerdo con estimaciones de durabilidad de la batería se ha verificado un hecho que, en vista de las mediciones de consumo en los nodos, resulta evidente: a pesar de tratarse de tecnologías de muy bajo consumo energético, el consumo global de cada nodo tiende al demandado por la plataforma controladora (Waspote en este caso).

Se ha llevado cabo a continuación una evaluación considerando tan sólo el consumo referido a los módulos de radio. En el caso de la tecnología BLE, se ha realizado una breve comparativa entre el funcionamiento tradicional (topología conectada y basada en la notificación del maestro en cada transmisión del esclavo) y el propuesto en este trabajo (ver figura 4). La corriente demandada en cada uno de los casos se muestra en la figura 8, donde se ha representado el consumo del módulo de radio BLE112 tras el envío de un paquete de datos en caso de permanecer conectado (gráfica superior) y en caso de dormir la radio en períodos de inactividad (gráfica inferior).

Como se puede apreciar, esta propuesta consigue optimizar el consumo de corriente, dependiente del tiempo que dos dispositivos BLE se mantienen conectados, interrumpiendo la conexión tras el envío del paquete de datos para permanecer en un modo constante de ahorro de energía que posibilita la conexión de un maestro en cualquier momento. De manera análoga, en base a las medidas realizadas en la transmisión de paquetes vía LoRaWAN, se ha deter-

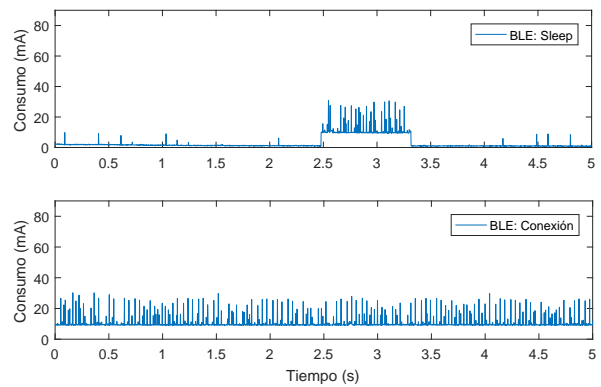


Fig. 8. Corriente demandada en transmisión (BLE112)

minado el consumo medio de corriente demandado únicamente por el módulo de radio. Estos consumo se encuentran recogidos en la tabla III. Por último, considerándose intervalos de envío de 3 minutos, se ha aproximado el consumo medio por ciclo en cada una de las configuraciones:

- LoRaWAN. El consumo medio del módulo de radio por ciclo considerando una transmisión en la configuración DR5 es de 2.76 mA, diez veces menor al obtenido considerando la corriente demandada por la plataforma controladora en modo activo.
- BLE. Considerando una conexión permanente entre maestro y esclavo, se obtiene un consumo de 9.47 mA (aproximadamente la mitad del obtenido con anterioridad). Asimismo, si se aplica la propuesta de hacer que el módulo de radio permanezca en modo de ahorro de energía (además de dormir la placa controladora), se reduce el consumo hasta 1 mA, lo cual resulta casi diecisiete veces menor al obtenido en los experimentos.

TABLA III
CONSUMO MEDIO (RECOMENDACIONES)

	LoRaWAN	BLE	
	DR5/SF7	Conexión	Sleep
Tx	40.87 mA	9.51 mA	10.24 mA
Inactivo	2.75 mA	9.47 mA	1.03 mA

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un escenario en que dos tecnologías se comunican para el intercambio de información. Las tecnologías analizadas son BLE y LoRaWAN, referentes en el despliegue de todo tipo de aplicaciones en entornos IoT que requieran un bajo consumo así como un gran alcance. Por ello, en primer lugar se propone una arquitectura de red que combina ambas tecnologías con objeto de afrontar las limitaciones que BLE impone en cuanto al rango de comunicación así como las que LoRaWAN presenta en cuanto al tiempo máximo de ocupación del canal.

Se ha desplegado un prototipo de red IoT en el I³A de acuerdo con la arquitectura propuesta utilizando placas controladoras Waspote, en que un end-device LoRaWAN ha transmitido un paquete que ha sido recibido por el dispositivo periférico BLE a partir del back-end TTN. Para ello, dado a que hasta el momento la localidad de Albacete no contaba con cobertura de redes LoRaWAN, se ha configurado y desplegado una estación base LoRaWAN (gateway) capaz de retransmitir los paquetes entre los nodos a los que proporciona cobertura y el back-end TTN. Por último, el prototipo de red utilizado para la evaluación descrita en este trabajo también cuenta con una subred únicamente basada en la tecnología BLE, en la que se han evaluado distintos modos de comunicación reflejados en el estándar para cuantificar las diferencias existentes en cuanto al consumo energético.

Durante los experimentos propuestos se ha medido el consumo medio por ciclo de cada uno de los nodos periféricos en el escenario propuesto de envío/recepción en la red LoRaWAN/BLE. Los resultados han permitido estimar una vida útil de la batería de los nodos utilizados que, en el mejor de los casos, se aproxima a 16 días de duración. Por tanto, en este trabajo se ha cuantificado con medidas reales el hecho de que la duración de la batería en los nodos analizados se debe, en gran medida, al consumo base demandado por la plataforma controladora utilizada. Por ello, en este trabajo se proponen distintas recomendaciones en cuanto a la configuración de los dispositivos que forman parte de redes heterogéneas de IoT. Poniendo a prueba estas recomendaciones mediante las tecnologías LoRaWAN y BLE, se ha configurado de un modo de bajo consumo en el microcontrolador en ocasiones en que el tiempo de respuesta no ha sido sea determinante, midiéndose nuevamente el consumo de los dispositivos en cuestión. Los end-devices LoRaWAN han demostrado un consumo hasta diez veces menor que el medido inicialmente. En cuanto a BLE, ha reducido su consumo hasta alcanzar cifras diecisiete veces menores a las obtenidas durante los experimentos realizados en los análisis anteriores.

Como línea futura de trabajo se propone ampliar el prototipo desplegado incluyendo nuevas topologías así como tecnologías adicionales que permitan la evaluación del consumo energético en redes heterogéneas de sensores con distintas funcionalidades. Por tanto, se propone utilizar el prototipo de red desplegado actualmente en el I³A como banco de pruebas para la experimentación con distintos algoritmos de mejora de la eficiencia energética con objeto de contribuir hacia el desarrollo de redes IoT sostenibles.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto POII-2014-010P de la JCCM, por los proyectos TIN2015-66972-C5-2-R (MINECO/FEDER) y TIN2015-65845-C3-2-R.

REFERENCIAS

- [1] Luigi Atzori, Antonio Iera, and Giacomo Morabito, "The internet of things: A survey," *Computer networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787-2805, 2010.
- [2] Li Da Xu, Wu He, and Shancang Li, "Internet of things in industries: A survey," *IEEE Transactions on industrial informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2233-2243, 2014.
- [3] Edward A Lee, "Cyber physical systems: Design challenges," in *Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC), 2008 11th IEEE International Symposium on*. IEEE, 2008, pp. 363-369.
- [4] Dave Evans (Cisco), "The Internet of Things - How the Next Evolution of the Internet is Changing Everything," .
- [5] Bluetooth SIG, "Specification of the bluetooth system. covered core package version: 4.0," 2010.
- [6] LoRa Alliance, "LoRa Alliance, Wide Area networks for IoT," .
- [7] Jayavardhana Gubbi, Rajkumar Buyya, Slaven Marusic, and Marimuthu Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions," *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 29, no. 7, pp. 1645-1660, Sept. 2013.
- [8] V. Lopez C. Garrido, T. Olivares and M.C. Ruiz, "Architecture Proposal for Heterogeneous, BLE-based Sensor and Actuator Networks for Easy Management of Smart Homes," in *Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, April 2016.
- [9] Chun-Hsien Wu and Yeh-Ching Chung, "Heterogeneous wireless sensor network deployment and topology control based on irregular sensor model," *Advances in Grid and Pervasive Computing*, pp. 78-88, 2007.
- [10] Artem Dementyev, Stuart Taylor Steve Hodges, and Josh Smith, "Power Consumption Analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee, and ANT Sensor Nodes in a Cyclic Sleep Scenario," April 2013.
- [11] Matti Siekkinen, Markus Hienkari, Jukka K Nurminen, and Johanna Nieminen, "How low energy is bluetooth low energy? comparative measurements with zigbee/802.15.4," in *Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), 2012 IEEE*. IEEE, 2012, pp. 232-237.
- [12] Low-Power Wide-Area Network and Low-Power Network LPN, "Low Power Wide Area Network," .
- [13] Ferran Adelantado, Xavier Vilajosana, Pere Tuset-Peiro, Borja Martinez, and Joan Melia, "Understanding the limits of LoRaWAN," *arXiv preprint arXiv:1607.08011*, 2016.
- [14] Konstantin Mikhaylov, Juha Petäjäjärvi, and Tuomo Haenninen, "Analysis of capacity and scalability of the lora low power wide area network technology," in *European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference; Proceedings of*. VDE, 2016, pp. 1-6.
- [15] Bluetooth SIG, "Bluetooth core specification v 5.0," 2016.
- [16] Bluetooth SIG, "Specification of the bluetooth system. covered core package version: 4.1," 2013.
- [17] Bluetooth SIG, "Specification of the bluetooth system. covered core package version: 4.2," 2014.
- [18] Diego Hortelano, Teresa Olivares, M. Carmen Ruiz, Celia Garrido-Hidalgo, and Vicente López, "From Sensor Networks to Internet of Things. Bluetooth Low Energy, a Standard for This Evolution," *Sensors*, vol. 17, no. 2, 2017.
- [19] LoRaAlliance, *LoRaWAN R1.0 Specification*.
- [20] ETSI, "European Telecommunication Standards Institute," .
- [21] The Things Network, "Building a Global Internet of Things Network Together," .
- [22] Libelium, "Waspote," <http://www.libelium.com/products/waspote/>.
- [23] Bluegiga BLE112, "Ble112 module," https://www.bluetooth.org/tpg/RefNotes/BLE112_Datasheet1.pdf.
- [24] Microchip, *RN2483 LoRa Technology Module Command Reference User's Guide*.
- [25] Raspberry Pi Foundation, "Raspbian jessie operative system," <https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/>.
- [26] Lady Ada, *Adafruit INA219 Current Sensor Breakout*.
- [27] Bluetooth SIG, "Bluetooth Technology Basis: Bluetooth Low Energy," <https://www.bluetooth.com/>.
- [28] ATMEL, "Atmega microcontrollers," <http://www.atmel.com/>.